超细 X 射线密度测井仪器优化设计与测量验证

张琼 [1] 汪洋 [1]
1（电子科技大学 自动化工程学院 成都 610000）

摘要 随着油气开采的深入，作为新一代可控源，X 射线密度测井仪器设计和测量方法的研究受到广泛关注。以超细伽马仪器为原型，将伽马源更改为 X 射线源，具体内容包括：1）X 射线源能谱模拟匹配；2）通过探测效率、地层灵敏度、探测深度等指标综合指导仪器关键参数正向设计；3）基于多变量正反演方法开展 X 射线密度测量，并与伽马测井进行对比。结果显示：X 射线仪器的近、远探测器源距设置为 110mm 和 290mm 时可达到比伽马仪器更高的探测指标。相较于伽马测井，X 射线测井具有更佳的地层灵敏度、垂直分辨率和地层测量准度。地层密度和 Pe 分别满足 0.015g/cm^3 和 0.2b/e 以内，尤其在重泥饼场景中，Pe 测量准度提升了 47%。这些研究为仪器正向设计以及 X 射线密度测量提供了参考。

关键词 X 射线密度测井；仪器正向设计；蒙特卡罗方法
中图分类号 TL99（建议原子能技术类的中图分类号）
DOI:

Optimized design and measurement verification of ultra-slim X-ray density logging tool

ZHANG Qiong[1] WANG Yang[1]
1(*School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610000, China*)

Abstract [Background]: With the deepening of oil and gas exploration, the research on the design and measurement methods of X-ray density logging tools, as a new generation of controllable sources, has attracted widespread attention. **[Purpose]:** Based on the prototype of ultra-slim gamma logging tool, the gamma source is replaced with an X-ray source. **[Methods]:** The specific content includes: 1) simulating and matching the energy spectrum of the X-ray source; 2) comprehensively guiding the forward design of the key parameters of the tool through indicators such as detection efficiency, formation sensitivity, and detection depth; 3) conducting X-ray density measurements based on the multivariate forward and inverse modeling method, and comparing them with gamma density logging results. **[Results]:** The results show that when the short and long-spaced detectors' source distances of the X-ray tool are set to 110mm and 290mm, it can achieve comparable or even higher detection indicators compared to gamma tool. Compared with gamma logging, X-ray logging has better formation sensitivity, vertical resolution, and formation measurement accuracy. The formation density and Pe are within 0.015g/cm^3 and 0.2b/e, respectively. Especially in the barite mudcake scenario, the accuracy of Pe measurement has been improved by 47%. **[Conclusions]:** These studies provide reference for tool forward design and X-ray density measurement.

Key words X-ray density logging; Forward design of tool; Monte Carlo

近年来，地层密度和岩性在储层和油气评价中起着至关重要的作用，其中非常规及致密油气藏资源成为新的油气增长点[1-4]。随着油气资源的开发深入，其持续性发展需要注重安全、环保、清洁、可控。因此，可控 X 射线密度测井仪器的设计和测量方法的研究一直受到广泛关注。在 X 射线密度测量技术方面，斯伦贝谢是首个对 X 射线测量地层密度进行探索的公司。1987 年，King 和他的团队在斯伦贝谢就已经提出了一种利用电子直线加速器作为 X 射线源的密度测量设备，并对

国家自然科学基金(U23B20151 和 No.52171253)资助
第一作者：张琼，女，1986 年出生，2012 年于北卡罗莱纳州立大学获博士学位，研究领域 X 射线测井技术与方法
通讯作者：张琼，E-mail: zhangqio@uestc.edu.cn
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

其进行了详细的理论设计[5]。Bayless 在 1993 年也提出了使用加速器产生的 X 射线来测定地层密度，并且成功开发了一款实验室版的 X 射线测井仪器[6]。1994 年斯伦贝谢公司又基于 Varian 公司的 X 射线加速器进行了密度测井的原理性实验。然而，在这一阶段的早期研发过程中，X 射线大多基于体型庞大的电子直线加速器产生。这类加速器难以置于井下，因此不适用于深地探测。随着硬件技术的发展，国外学者和相关公司针对 X 射线密度测井样机的设计，展开了更为具体而深入的研究。Badruzzaman 等人[7]在 2014 年对 Cs-137 伽马源和 X 射线源的密度测量进行了深入的比较，从而验证了 X 射线密度测井的实施可能性。来自斯伦贝谢公司的 Simon 等人[8]在 2018 年第 59 届国际测井分析家年会上推出了一款 GSO 闪烁晶体的四探头密度测井仪器，它是目前少数已经公开发布的 X 射线密度测量设备之一。在 X 射线密度测量方法研究方面，斯伦贝谢 Simon 等人基于四探头伽马密度仪器，证明 X 射线密度测井有更高的地层密度灵敏度。国内来自电子科技大学的张琼等人的早期研究是对探测器的响应进行了全面的评估，这些评估包括密度测量的灵敏性、探测效率以及探测深度[9]。张锋等人通过数值模拟比较了 Cs-137 伽马源与 X 射线的响应特性，证明 X 射线和伽马源能量范围的不同导致地层对其衰减吸收不同，差异主要在于光电效应的影响[10-11]。于华伟等人则从 X 射线产生机制着手研究了 X 射线密度测井仪器应使用的最佳电压[12]。

这些研究结果对 X 射线在井下密度测量的使用以及仪器的设计都起到了重要的指导作用。本文以超细伽马仪器为原型，利用 Geant4 搭建仪器模拟平台，进行与斯伦贝谢 X 射线源能谱的模拟匹配。同时通过探测效率、地层灵敏度、探测深度等指标综合指导仪器源距等关键参数的正向设计。最后，基于优化后的仪器，利用多元非线性正反演方法开展 X 射线密度测量，并与伽马密度测井结果进行对比。

1 X 射线密度测量原理

X 射线岩性密度测井可以描述为一个深穿透问题，光子所走的路径将受到地层密度的影响。在致密的地层中，射线所走过的路径x将依赖于密度，并且可以用ρ_f中的一个泰勒多项式展开来近似表示。通常，泰勒展开的前三阶可以提供足够的精度，则与密度相关的等式可以描述为[13-14]：

$$C_1 = b_1 \rho_f^{b_2} e^{b_3\rho_f + b_4\rho_f^2 + b_5\rho_f^3} \tag{1}$$

对于具有介入泥浆或泥饼的实际测井条件，当密度或厚度未知的材料放置在仪器表面和密度有待确定的地层岩石之间时，每个探测器的计数率都会受到扰动。因此，作为校正中间泥饼的操作程序，可以使用长间距和短间距探测器的视密度来定义确定校正$\Delta\rho_f$的算法。$\Delta\rho_f$与泥饼厚度（h_{mc}）和地层密度（ρ_f）与泥饼密度（ρ_{mc}）之间的密度差的乘积成比例，具体可以表示为：

$$\Delta\rho_f \propto h_{mc}(\rho_f - \rho_{mc}) \tag{2}$$

因此，考虑到泥饼存在时进行的修正，地层密度计算相关的表达式可以更新为：

$$C_1 = b_1 \rho_f^{b_2} e^{b_3\rho_f + b_4\rho_f^2 + b_5\rho_f^3 + b_6 h_{mc}(\rho_f - \rho_{mc})} \tag{3}$$

除此之外，地层 Pe 的测量也来自密度仪器，光电吸收的截面概率主要取决于光子能量和散射材质的原子序数 Z。同样考虑到泥饼 Pe 和泥饼厚度的影响，如前面康普顿散射所描述的情况，$\Delta L_f \propto h_{mc}(\rho_f L_f - \rho_{mc} L_{mc})$，地层 Pe 计算的相关表达式可以具体表征为：

$$C_2 = e^{d_1\rho_f L_f + d_2 h_{mc}(\rho_f L_f - \rho_{mc} L_{mc})} \tag{4}$$

根据射线与物质相互作用的物理定律，为了得到一个易于处理的正向模型的表达式，将各个能量窗口计数被参数化为与地层和泥饼性质相关的非线性函数，对应于第i个探测器的能量窗口j：

$$C_{i,j} = e^{a_{i,j}^1 + a_{i,j}^2\rho_f + a_{i,j}^3\rho_f^2 + a_{i,j}^4\rho_f^3 + a_{i,j}^5\rho_f L_f + a_{i,j}^6 X_3 + a_{i,j}^7 X_4}$$
$$i \in \{1,2\}, j \in \{1,2,3,4\} \tag{5}$$

一旦正演模型推导完成，就可以构建反演模型。多参数反演可以描述为在正演模型的基础上找到逆问题的最优递归解的过程。为了构建反演模型，使用了四个可解参数：地层密度（ρ_f）、地层 Pe（L_f），一个表示地层和泥饼密度之间对比度的混合项（X_3），以及一个表示地层和泥饼 Pe 之间对比度的混合项（X_4）。将正演模型的多变量非线性拟合中导出的系数矩阵用作预定义输入。因变量表示为对数变换矩阵，该矩阵表征近、远探测器的每个能量窗口内的计数$C = [lnC_{1,1} \cdots lnC_{2,4}]$，目标函数表示为公式(6)。值得指出的是，我们面对的是一个超定方程组，其中方程的数量超过了未知数的数量。为了更好地关联待求解参数的应用场景，我们在目标函数中引入了 L2 正则化项。该正则化项的目的是增强关键参数（即地层密度和地层 Pe）的求解，确保解过程中不仅满足方程组的约束，而且表现出获得近似解的稳定性和光滑性。正则化项指导了近似解搜索

的方向，使其更符合我们的期望，并降低了对环境测量噪声和数据微小变化的敏感性，从而增强了获取近似解的鲁棒性，目标函数具体表征如下：

$$g(x) = f\left(x\left(\rho_f, L_f, X_3, X_4\right)\right) + \frac{\lambda}{2} \parallel x\left(\rho_f, L_f\right) \parallel_2^2 \quad (6)$$

为了求解公式(6)，我们采用了一种改进的拟牛顿方法。拟牛顿法由于其通过近似给定目标函数的二阶导数并采用 Wolf 线搜索规则来获得快速收敛的能力而在很多领域得到了很好的应用。因此，它是解决在防止过拟合的同时对搜索效率要求很高的最小化问题的一个很好的候选方法。此外，将每次迭代的误差作为权重系数合并到目标函数中的每个能窗表达式项中，以实现对不同能窗表达式的自适应加权调整，从而提高了地层密度和 Pe 的求解准度。具体表达式如公式(7)所示，其中$\hat{x}$表示最优参数，W_i表示调整后的权重，$R(\hat{x})$是L_2正则化项。

$$\hat{x}\left(\rho_f^*, L_f^*, X_3^*, X_4^*\right) = \underset{\hat{x}\left(\rho_f^*, L_f^*, X_3^*, X_4^*\right)}{argmin} \left\{ \sum_{i=1}^{N=10} W_i\left(f_i(x) - f_i(\hat{x})\right)^2 + R(\hat{x}) \right\}$$
$$s.t. \begin{cases} \rho_{f_min} \le \rho_f \le \rho_{f_max} \\ L_{f_min} \le L_f \le L_{f_max} \\ X_{3_min} \le X_3 \le X_{3_max} \\ X_{4_min} \le X_4 \le X_{4_max} \end{cases} \quad (7)$$

2　X 射线源能谱模拟

为了在井下进行 X 射线密度测量，我们需要以钻杆仪器作为基准，建立高精度的岩性密度测量模型。在这个过程中，第一步必须确保 X 射线管产生的源能谱被正确地设置。在真空环境中，我们可以通过向阴极施加大量的压力以引导快速的电子。一旦这些快速的电子和具有较高原子序列的目标物质相互冲击，就能够形成一系列的 X 射线源能谱。该能谱中主要包含连续能量的韧致辐射和与被碰撞物体元素成分相关的特征 X 射线[15-16]。进一步的，将产生的射线经过过滤材料滤除低能段谱，最终得到所需能量和强度的 X 射线源能谱，如图 1 所示意。

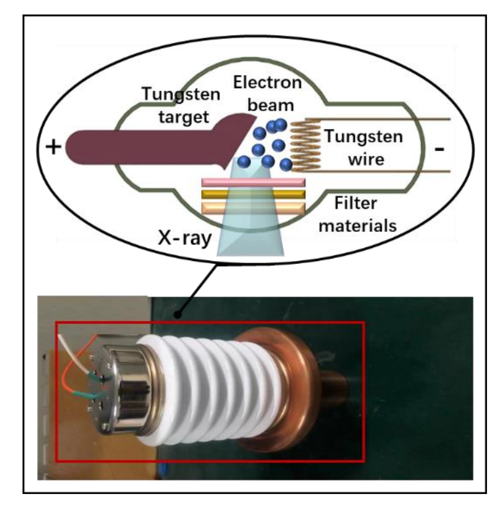


图 1　X 射线管及内部结构图

Fig.1　X-ray Tube and Internal Structure Diagram

另外，经过初步研究，我们发现在井下 X 射线密度测量领域，斯伦贝谢 Simon 等人所提出的四探头岩性密度测井仪是目前唯一被实际应用的。这台设备用具有 350 keV 端点能量和大约 250 keV 平均能量的 X 射线源来取代 Cs137 源，以便进行井下密度的测定。所以，我们选择了斯伦贝谢使用的源能谱来对井下 X 射线岩性密度的测定进行研究，同时基于 Geant4 对该能谱进行仿真和匹配。为了和斯伦贝谢能谱吻合，如图 2 所示，这里通过 Geant4 所模拟的 X 射线管参数包括放置在真空室中的 350 keV 电子束、钨靶、过滤材料和射线探测区域等部件。其中探测区域设置为敏感探测器，以此来记录穿过探测区域的每个光子的能量，进而形成能谱。

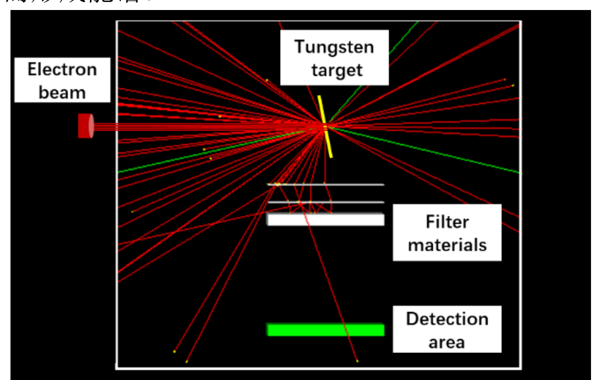
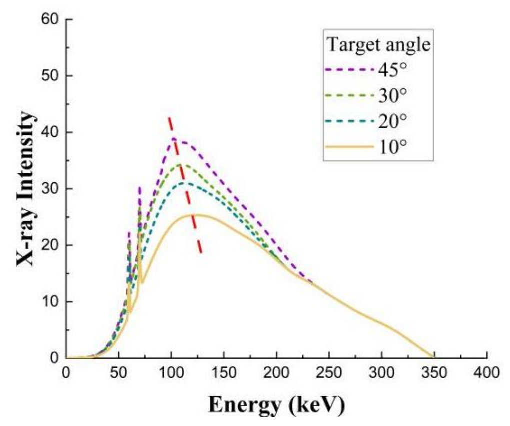


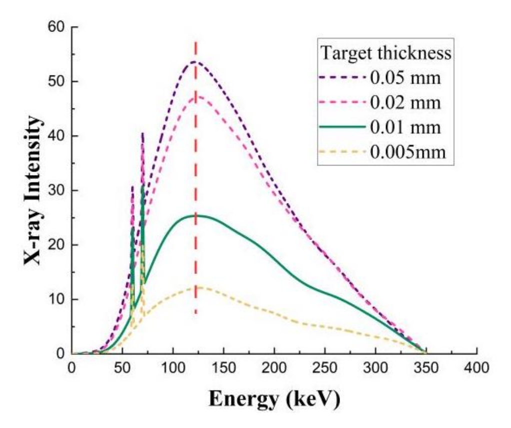
图 2　基于 Geant4 的 X 射线管模拟

Fig.2　X-ray tube simulation based on Geant4

在 X 射线能谱模拟过程中，除了过滤材料用于有效滤除 X 射线低能段以选取特定能量范围的 X 射线外，阳极钨靶是另一个核心组成部分，对 X 射线能谱形状具有重要影响。通过模拟不同靶厚度和靶角度的变化，我们得到对应 X 射线源能谱，并对其变化规律进行了分析，结果如图 3 所示。



(a) 不同靶角度下 X 射线源能谱能量与强度变化



(b) 不同靶厚度下 X 射线源能谱能量与强度变化

图 3 钨靶参数变化响应

Fig.3 Response to changes in tungsten target parameters

图 3(a)结果显示，通过更改不同的靶角度，随着钨靶角度的增加，能谱峰值对应的能量向低能方向移动。这主要是因为靶角度的增加导致入射X射线与靶材料的相互作用路径变短，从而转移给靶材料中电子的数量减少，进而产生的 X 射线能量较低。与此同时，X 射线在钨靶中的衰减程度随着角度的减小而增加，较小的靶角度意味着 X 射线与靶材料的交互作用增强，导致更多的 X 射线被吸收，从而降低了最终检测到的 X 射线强度。通过调整发现，在 10° 靶角下，模拟得到的源谱峰值能量位置与斯伦贝谢的能谱相匹配，而谱的强度偏低，因此我们进一步调整了钨靶的厚度以匹配其能谱强度。从图 3(b)中可以看出，随着靶厚度的增加，X 射线能谱强度增大，而峰值能量位置保持不变。这说明靶厚度的增加并不改变 X 射线的主要能量分布，而是增加了产生的 X 射线粒子数目。最终，当钨靶厚度为 0.01mm 时，钨靶角度为 10° 时，仿真得到的 X 射线源能谱与斯伦贝谢能谱的峰值强度均相匹配。相关匹配结果如图 4 所示，可以看出，截去 100keV 以下时钨靶中含有的元素特征峰后，仿真与实测源能谱匹配良好。

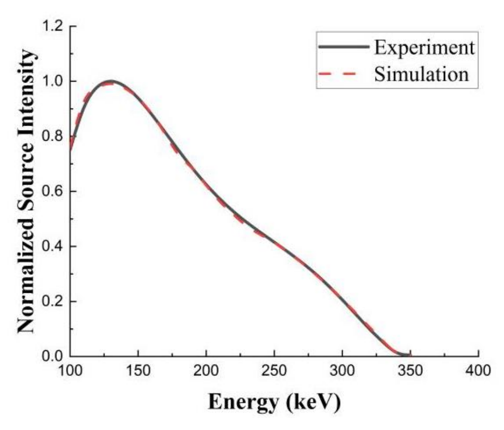


图 4 Geant4 仿真与斯伦贝谢实测能谱匹配

Fig.4 Matching of Geant4 simulation and Schlumberger's measured energy spectrum

最终，我们得到了与斯伦贝谢实测能谱相匹配的仿真结果，即端能量为 350 keV，平均能量约为 250 keV 的 X 射线能谱。相比于 Cs137 伽马化学源，井下 X 射线源能量更低，强度更高[17]。同时可控 X 射线源方向确定，这样有利于有效控制光子发射的角度。接下来将会采用该能谱进行基于超细的 X 射线岩性密度仪器参数优化设计，并对测量响应进行理论探索与验证。

3 基于 X 射线源的超细仪器结构设计与优化

康普顿效应是 X 射线和伽马射线用来测定地层密度的基础，然而，X 射线的能量较低，具有更高的光电效应概率，这将进一步会影响密度测量的结果。因此，只有对仪器的主要参数进行重新设计，才能将 X 射线管作为发生辐射源的装置。探测器的源距的设置会直接影响到探测的效率、地层的密度灵敏度以及探测深度等各项参数。因此，我们的目标是在原本超细仪器结构允许的基础上，通过改变近、远探测器源距的设置和调整其他结构参数，以达到和优化前使用伽马源测量得到的一致或更高的指标。对于 X 射线密度测井模型，我们根据以下三个指标维度进行综合评估，从而选择与伽马仪器相同或更高的指标结果来协助 X 射线源距的确定，具体如下：

（1）探测效率：利用最大检测效果来衡量设备的功能，这涉及多个元素，例如几何效果、屏蔽衰减、以及检测设备的本质效果，正如公式（8）所示，绝对探测效率K表示为探测器探测到的总计数N_c与 X 射线产生的光子数N_s的比值[18]：

$$K = \frac{N_c}{N_s} * 100\% \tag{8}$$

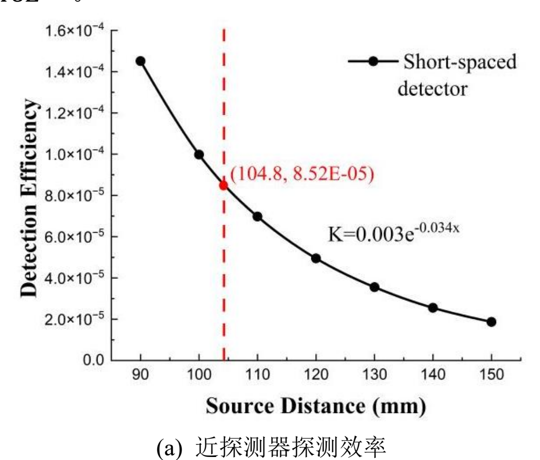
（2）地层密度灵敏度：通过获取对于密度测定的基本响应方程，并将这些方程又可被转换成对于地层密度的敏感性S，其具体的表达方法如公式（9）所描绘，N_d为密度窗计数，探测器测量地层密度的准度与灵敏度数值呈正相关[19]。

$$S = |\frac{\partial(lnN_d)}{\partial\rho_f}| * 100\% \tag{9}$$

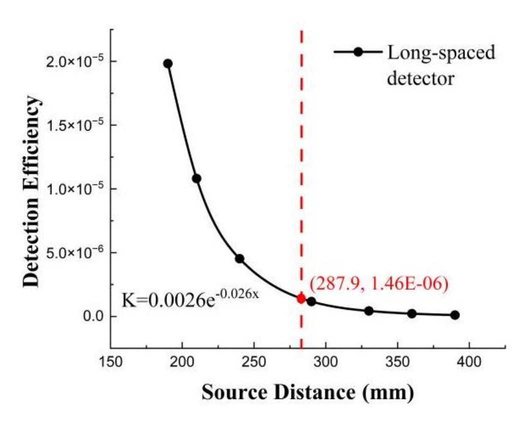
（3）探测深度：探测深度，即 DOI（Depth of Invasion），指的是在探测过程可贡献 90%总计数的地层深度。随着探测深度的增加，探测器能够收集到更多关于地层的信息。因此，通过调整源距，可以补偿这些环境参数对探测结果的影响，确保获取更准确、全面的地层信息。

3.1 不同源距的探测效率对比分析

已知，伽马源的超细岩性密度仪器近、远探测器源距分别为 155.7mm 和 394.97mm。考虑到超细仪器本身的结构限制，近、远探测器的源距最大可调整范围分别为 40~155.7mm 和 190~394.97mm。首先我们从探测效率角度初步确定使用 X 射线源时的源距范围。选择 10%孔隙度的石灰岩地层作为标准环境，同时，为了保证模拟结果与实际测井条件相符，在模拟数据处理过程中，由于 Cs137 的源强设为10^9Bq，所以 X 射线源强的设置为10^{10}Bq。接下来的模拟均以 X 射线比 Cs137 多一个量级的粒子数开展模拟。与此同时，由于 X 射线源发射角度具有定向性，因此将之前超细伽马源仪器的 30~45°楔形出射角修改为固定的 45°出射角，从而更加符合实际仪器设计。通过模拟不同源距，计算对应源距下的探测效率，并与伽马源的探测效率进行对比，结果如下图 5 所示。已知伽马源的近、远探测器的探测效率分别为$8.52E^{-5}$和$1.46E^{-6}$。



(a) 近探测器探测效率



(b) 远探测器探测效率

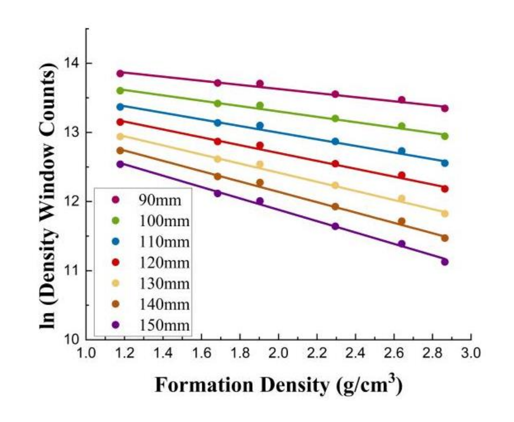
图 5 不同源距下近、远探测器探测效率变化

Fig.5 Response of detection efficiency of near and far detectors at different source distances

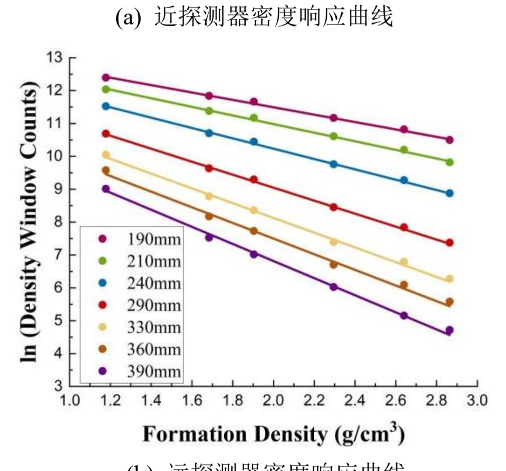
根据图 5 所展示的探测能力和源距的相互影响曲线，我们能观察到，当源距提升时，探测能力会呈现指数级别的减少，也就是说，源距的增长会导致探测能力的减弱。图中红色虚线所划定的位置为与伽马源为同一探测效率时的 X 射线源距。为了使得 X 射线源的探测效率达到伽马源相当的数量级，初步划定近、远探测器的源距分别为 100~110mm 和 280~290mm。

3.2 不同源距的地层灵敏度对比分析

密度灵敏度是衡量密度测井仪器性能的重要指标之一。可以表征为单位地层密度变化下对应的探测器光子计数变化量，仪器密度灵敏度决定着仪器对于地层的分辨能力。选取不同孔隙度的砂岩、石灰岩和白云岩地层（密度范围为 1.904 g/cm³ ~ 2.864 g/cm³），进而模拟不同源距下地层密度与探测器计数的响应关系。在计算密度灵敏度时，选择大于 0.15MeV 能量段的密度窗口计数建立响应曲线，从而进一步确定 X 射线岩性密度理论仪器的源距设计范围。相关结果如图 6 和图 7 所示。已知伽马源的近、远探测器的地层灵敏度分别为 0.4468 和 1.90。



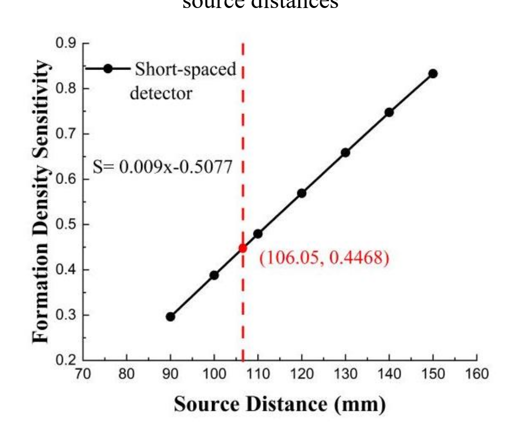
(a) 近探测器密度响应曲线



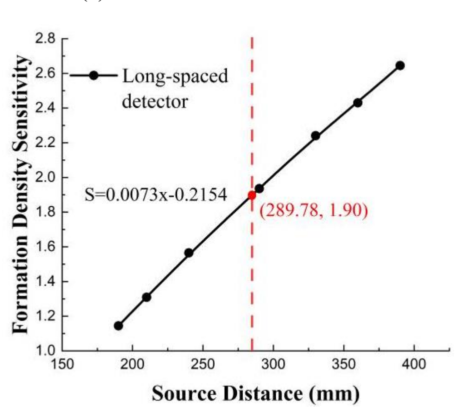
(b) 远探测器密度响应曲线

图 6 不同源距密度窗计数取对数与地层密度响应关系

Fig.6 The relationship between logarithm of density window counting and formation density under different source distances



(a) 近探测器地层密度灵敏度



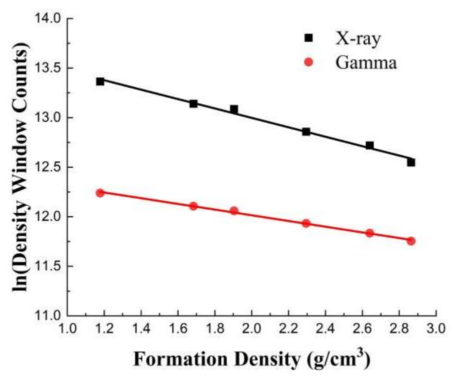
(b) 远探测器地层密度灵敏度

图 7 不同源距下地层密度灵敏度

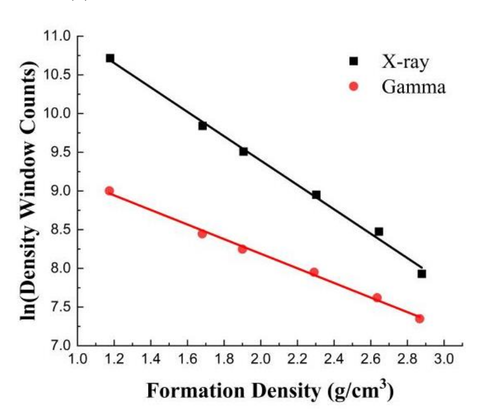
Fig.7 Sensitivity of formation density under different source distances

图 6 揭示了近距离和远距离探测器在不同源距下地层密度与探测器密度窗计数取对数的反应关系，每一条反应曲线斜率的绝对值代表其地层密度灵敏度S，因此，我们可以进一步将不同源距的密度灵敏度绘制成图 7 所示。根据图 6 的数据结果，我们可以看出，当地层密度升高时，探测器的计数会相应减少，这主要是因为大部分的粒子无法通过地层，进入探测器。进一步的，如图 7 所示，探测器探测得到的地层灵敏度随着源距增加而不断增加，整体趋势呈现线性增长，其中红色虚线交点为达到与之前伽马源相同地层灵敏度的最低源距。因此，为了达到和伽马源所在源距下相当或者更高的灵敏度，满足现有密度测井技术需求，综合之前计算的探测效率约束，计算得到近、远探测器的源距范围分别缩至 106.05~110mm 和 289.78~290mm。

同一源距下 X 射线源测井仪的灵敏度要明显高于伽马测井仪，这是因为 X 射线源释放的光子能量更低，光子在穿越不同密度地层时，受到的衰减作用变化率更为显著。此外，对于相同的地层密度，由于可控 X 射线源发射的光子数量更多，使用 X 射线测井仪在探测器计数上通常要高于伽马测井仪。为了验证该结论，我们在同一源距下对比了 X 射线源和伽马源的地层密度灵敏度，并且相关结果如图 8 所展示：



(a) 近探测器地层密度灵敏度对比



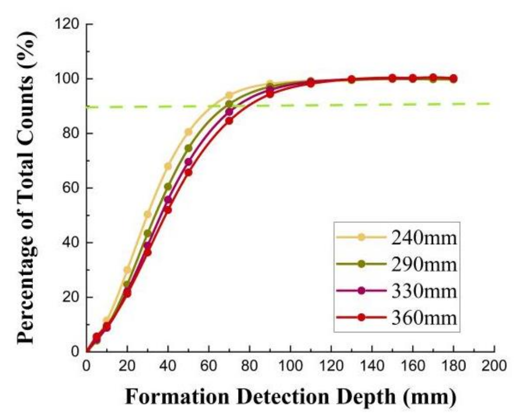
(b) 远探测器地层密度灵敏度对比

图 8 同一源距下 X 射线源与伽马源的地层密度灵敏度

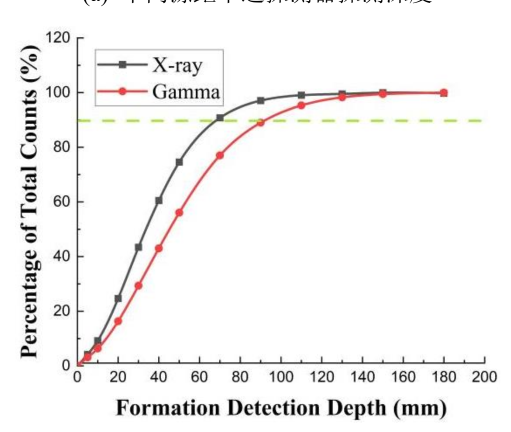
Fig.8 Formation density sensitivity of X-ray and gamma sources at the same source distance

3.3 不同源距的探测深度对比分析

密度测井的应用，主要依赖于远探测器来获取地质数据。在使用 X 射线岩性密度理论仪器进行地层数据的检测过程中，如果遇到了泥饼或间隙，那么探测器会捕获来自于井眼（或泥饼）的 X 射线，这些射线会通过地层的散射，最终返回至井眼。在探测器的源距有所差异的情况下，其对于探测器的计算结果的贡献也会有所不同。探测深度（DOI）代表了探测器对外界环境的感知程度，同时也揭示了空间中不同元素对测井活动的影响程度。当 DOI 达到 90%，该数值代表了射线可以探测到的最大地层深度，也就是探测器的探测深度。利用 Geant4 建立仪器探测深度模型，在 10%孔隙度的石灰岩地层上逐步加厚地层，分别模拟不同源距下不同地层厚度的探测器计数，从而获取相应的探测深度响应曲线。从图 9(a)中我们能明显观察到，当地层的衰减路径发生变化时，探测器接受的 X 射线也会相应的发生变化。这表明，随着源距的增加，探测的深度也会相应增加。



(a) 不同源距下远探测器探测深度



(b) 新远源距下 X 射线和伽马探测深度对比

图 9 远探测器探测深度

Fig.9 Far detector detection depth

因此在源距设计中，根据图 5 至图 9 所分析指标，即兼顾探测效率、地层灵敏度和探测深度，最终综合确定 X 射线岩性密度理论仪器的近、远探测器源距分别为 110mm 和 290mm。相比较伽马源，近、远探测器的源距分别缩短了 29.3%和 27.4%，这意味着 X 射线岩性密度仪器的垂直分辨率提高了相应同等的比例。与此同时，如图 9(b)所示，相较于修改前的远探测器源距，利用 X 射线测量时其探测深度减小了 2cm 左右，因此可以维持相当的探测深度。

4 结果和讨论

为了评估经过优化设计的 X 射线岩性密度仪器计算效果，本节将从理论上验证其地层密度和 Pe 测量的准确性。我们根据 X 射线岩性密度理论仪器的响应特征，开展适用于 X 射线的能窗划分，并将通过多变量正反演方法，计算含轻、重泥饼场景下的地层参数，并与同一环境下的伽马测井结果进行对比分析。

4.1 X 射线仪器能窗划分

由于 X 射线和伽马源强分布不同，所以探测器能谱响应的形态也不同[20]。利用上述两个岩性密度测井的蒙特卡罗模型，模拟 10%孔隙度的石灰岩地层（2.53 g/cm^3），并利用探测器记录来自地层的光子。将收集得到的能谱的能量值作为横坐标，远探测器光子计数作为纵坐标，以反映 X 射线源和伽马源的能谱响应差异。从图 10 中可以看出，可控 X 射线密度测井仪器记录到的光子集中在 0.25 MeV 能量以内，伽马密度测井仪器能够探测的光子能量约 0.5 MeV 以内。同时，由于 X 射线源强度比伽马射线高一个量级，因此 X 射线在低能区的被探测的粒子高于伽马源，康普顿效应在两种仪器的 150 keV 以上能量段都占主导地位。

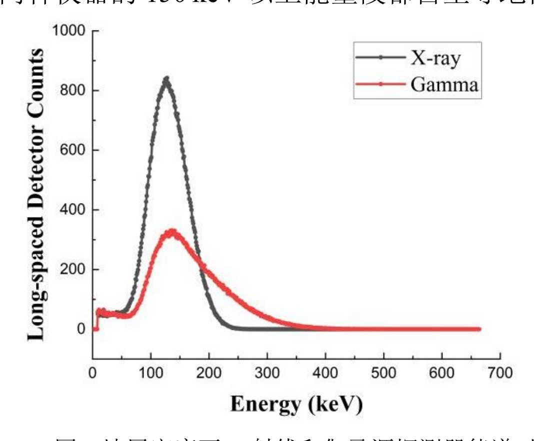


图 10 同一地层密度下 X 射线和伽马源探测器能谱对比

Fig.10 Comparison of detector spectral responses between X-ray and gamma sources at the same formation density

为了获得 X 射线岩性密度测井中准确的地层参数，我们需要充分利用探测器能谱的特征和变化规律，将能谱信息划分为适当的能量窗口[21]。通过设置密度均为 2.4 g/cm^3 的三种不同孔隙度的砂岩、石灰岩和白云岩，其 Pe 值分别为 1.706 b/e、4.693 b/e 和 2.823 b/e，分析 X 射线密度和 Pe 的能量窗口范围。与此同时，根据环境参数与能谱道值的相关性，以及正演拟合的数据规律，来进一步对多个能量窗口进行调整，最终获得如图 11 所示的能量窗口划分，其能量范围分别为 0.04~0.08 MeV、0.08~0.12 MeV、0.12~0.18 MeV 和 0.18~0.25 MeV。

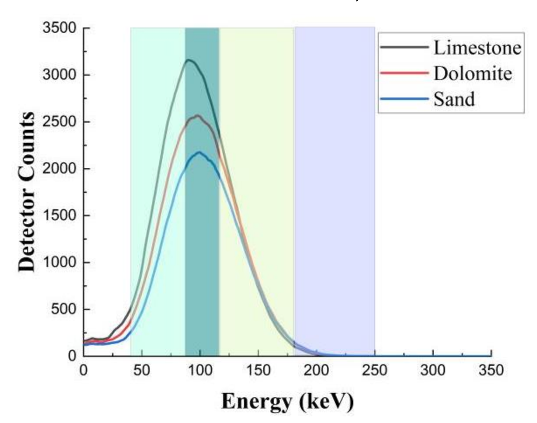


图 11 同一密度下三种岩性地层能谱对比

Fig.11 Comparison of energy spectra of three types of lithology under the same formation density

低能窗口内的计数受光电效应的影响，较大的变化主要反映了被测介质的 Pe 值的差异，高能窗口内的计数主要受到康普顿效应的影响，它主要反映了被测介质的密度响应，除此之外，划分的每个能量窗口中的计数也均与泥饼的性质相关。接下来，我们会根据该能量窗口的划分结果，对地层参数进行反演计算。

4.2 轻、重泥饼环境下 X 射线测量结果验证

为了验证 X 射线岩性密度理论测井仪器在泥饼存在场景下测量地层信息的可行性，快速获取批量蒙特卡罗仿真数据库，同时利用多变量岩性密度测量新方法获得地层参数：地层密度和地层 Pe。所构建的新的不同环境参数下的蒙特卡罗仿真数据库包 180 组轻泥饼和 100 组重泥饼数据。具体模拟的地层包括 0~50%孔隙度的石灰石地层（密度范围：1.8515 g/cm^3~2.703 g/cm^3，Pe 范围：3.7076 b/e~5.0843 b/e）；轻泥饼密度为 1.352 g/cm^3~2.086 g/cm^3，泥饼 Pe 为 1.4013 b/e~2.5361 b/e，泥饼厚度为 5~15mm；重泥饼密度为 2.0 g/cm^3~2.5 g/cm^3，泥饼 Pe 为 105.84 b/e~160.06 b/e，泥饼厚度为 5~15mm。通过利用 X 射线岩性密度仪器所使用的能窗数据构建正、反演模型，进而计算得到地层参数。同时，我们还将基于伽马源的岩性密度仪器放在同一环境下进行蒙特卡罗模拟，并将计算的结果作为对比，分析两种仪器在存在泥饼场景下的测量结果。

首先，对轻泥饼场景下两种仪器的的反演结果进行了对比分析。选择的 70 组数据涵盖了不同的地层和泥饼信息，相关计算结果如表 1 和图 12 所示。其中，道 1 为泥饼密度，道 2 为泥饼厚度，道 3 为 X 射线和伽马仪器反演密度与真实密度的对比，道 4 为 X 射线和伽马仪器反演 Pe 和真实地层 Pe 的对比，道 5 为两种仪器分别与理论值的密度误差，道 6 为两种仪器分别与理论值的 Pe 误差。

表 1 轻泥饼环境下基于新方法的两种仪器反演结果对比

Table 1 Comparison of inversion results between two tools in no-barite mudcake environment

指标 Indicator	X 射线源 X-ray source	伽马源 Gamma source
平均密度误差 Average density error	0.0128 g/cm^3	0.0147 g/cm^3
密度均方根误差 Density RMSE	0.0102 g/cm^3	0.0131 g/cm^3
平均地层 Pe 误差	0.08 b/e	0.11 b/e
Pe 均方根误差 Pe RMSE	0.06 b/e	0.09 b/e

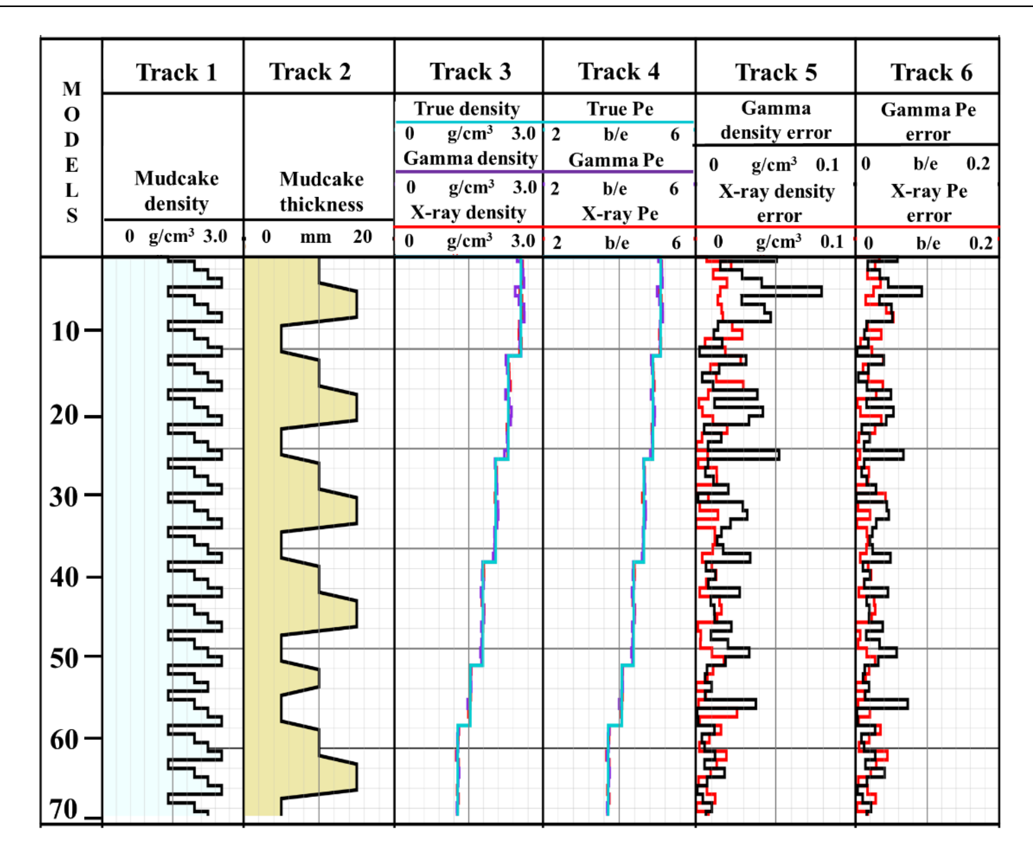


图 12　轻泥饼环境下两种仪器的地层密度和地层 Pe 反演结果对比

Fig.12　Comparison of formation density and Pe inversion results between two tools in no-barite mudcake environment

可以看出，在轻泥饼场景下，两种仪器计算的地层密度绝对误差均满足 0.015 g/cm³ 的准度要求，同时 Pe 值的误差均在 0.2 b/e 以内，这表明基于 X 射线源和伽马源的岩性密度仪器所反演获得的地层参数与已知的模拟参数高度一致。具体而言，作为测试集的数据库中 X 射线仪器获得的密度平均绝对误差为 0.0128 g/cm³，Pe 的平均绝对误差为 0.08 b/e；相同环境下伽马仪器计算的密度平均绝对误差为 0.0147 g/cm³, Pe 的平均绝对误差为 0.11 b/e。因此，使用 X 射线测量密度时误差下降了 13%，Pe 误差下降了 27%。这反映出 X 射线测量准度高于伽马源，特别是针对较高密度的地层测量，使用 X 射线源时测量误差会有所降低，因此，X 射线测井仪器可以获得更加准确的地层参数反演结果。

进一步的，我们同样选择 30 组重泥饼场景下的测试集数据，并对两种仪器的反演结果进行了对比分析，相关结果如表 2 和图 13 所示。道 1 为泥饼密度，道 2 为泥饼厚度，道 3 为 X 射线和伽马仪器反演密度与真实密度的对比，道 4 为 X 射线和伽马仪器反演 Pe 和真实地层 Pe 的对比，道 5 为两种仪器分别与理论值的密度误差，道 6 为两种仪器分别与理论值的 Pe 误差。

表 2　重泥饼环境下基于新方法的两种仪器反演结果对比

Table 2　Comparison of inversion results between two tools in barite mudcake environment

指标 Indicator	X 射线源 X-ray source	伽马源 Gamma source
平均密度误差 Average density error	0.0145 g/cm³	0.0150 g/cm³
密度均方根误差 Density RMSE	0.0139 g/cm³	0.0146 g/cm³
平均地层 Pe 误差	0.17 b/e	0.32 b/e
Pe 均方根误差 Pe RMSE	0.13 b/e	0.29 b/e

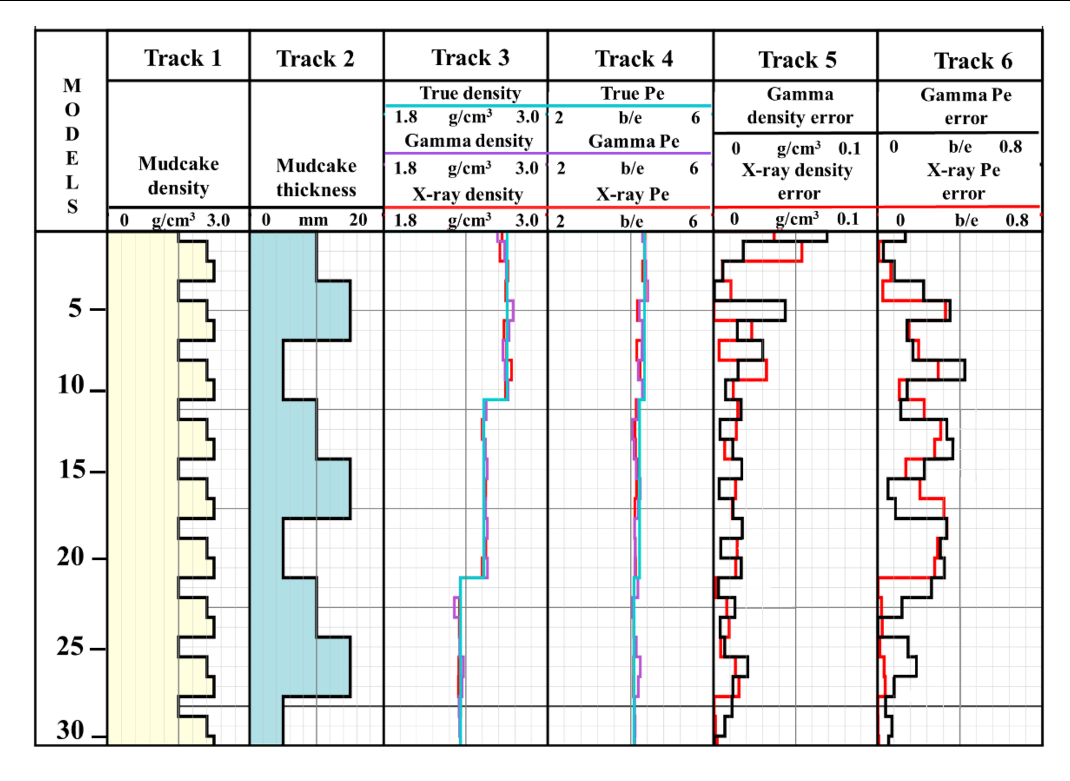


图 13　重泥饼环境下两种仪器的地层密度和地层 Pe 反演结果对比

Fig.13　Comparison of formation density and Pe inversion results between two tools in barite mudcake environment

观察表 2 和图 13 可以看出，使用 X 射线测井仪器获得的地层密度的平均绝对误差和 RMSE 分别为 0.0145 g/cm^3 和 0.0139 g/cm^3，满足 0.015 g/cm^3 的准度要求；同时，获得的 Pe 误差和 RMSE 分别为 0.17 b/e 和 0.13 b/e，满足 0.2 b/e 以内的准度要求。相较于 X 射线源，伽马测井仪器获得的密度平均绝对误差在 0.015 g/cm^3，而 Pe 误差为 0.32 b/e。根据第四章节的讨论可知，在基于多能窗划分的新测量方法中，重晶石的存在对于密度测量影响有限，然而由于重泥饼的高 Pe 值，使得对地层 Pe 的准确获取有较大影响。在这一章节，我们通过对比发现，使用 X 射线测井仪器计算的地层 Pe 值误差比伽马测井仪器低达 47%，其主要可能是由于 X 射线能量段对于 Pe 更加敏感，尤其光电窗的计数变化随着地层和泥饼的 Pe 差异表现出明显的响应。这一定程度上有利于 X 射线对 Pe 差异的信息捕捉，并将此差异反馈在探测器能谱中低能光电窗口的计数上，从而经过新方法获得更加准确的地层 Pe 信息。

总之，通过轻、重泥饼场景的测试，可以看出基于 X 射线源的岩性密度仪器测量结果整体优于伽马源岩性密度测井仪器，尤其在含有重晶石泥饼的场景中，X 射线由于其 Pe 敏感特性，使得地层 Pe 反演误差有所降低，这些结果表明了 X 射线岩性密度测井相比于传统密度测井的优势和测量的有效性。

5　结语

本文在超细伽马岩性密度仪器基础上，重新设计了一支基于 X 射线源的岩性密度理论仪器。通过对 X 射线源、源准直口等关键部件以及源距进行优化设计，确定了适合于 X 射线源的新源距和新仪器部件，得到一套仪器评估的具体流程及参数指标。进一步的，通过在有轻、重泥饼等理论环境中验证了 X 射线岩性密度测量结果的准确性，这些研究为推动国产化仪器的正向设计以及无源密度测量的发展提供了基础。具体结论如下：

（1）通过分析产生 X 射线源的钨靶的靶角度和靶厚度可知，靶角度主要影响源能谱的能量峰值位置，靶厚度主要影响源的强度。通过 Geant4 模拟设置端能量为 350 keV 电子束，靶角度为 10°、靶厚度为 0.01mm，并经过过滤材料过滤，可以得到与斯伦贝谢相吻合的井下 X 射线源能谱。同时，源的强度相比较于伽马源至少多一个数量级。

（2）在设计适应于 X 射线源的仪器结构参数中，综合探测效率、地层灵敏度、探测深度等指标，最终确认新理论仪器的近、远探测器源距分别为 110mm 和 290mm，近、远探测器的源距分别缩短

了 29.3%和 27.4%。此外，源出射角由 30° 至 45° 的楔形源更改为 45° 单方向源，这样可以得到和修改前伽马仪器相当甚至更高的性能指标。关键的评估指标如下：1）随着源距的增加，探测效率会呈指数级减少，在相同的源距下，X 射线仪器比伽马仪器有更小的探测器统计涨落误差；2）随着源距的增加，X 射线仪器对地层灵敏度也会提升，当源距保持不变的情况下，X 射线测井仪器的地层灵敏度会优于伽马测井仪器；3）在 X 射线测井仪器中，远探测器的探测深度范围约为 7cm，相较之前的伽马仪器，其探测深度降低了约 2cm，仍可以保持相当的探测深度。

（3）通过 X 射线不同地层岩性的能谱特性分析得出其多能窗划分范围分别为 0.04-0.08 MeV、0.08-0.12 MeV、0.12-0.18 MeV 和 0.18-0.25 MeV。通过多元非线性正反演计算方法，将 X 射线探测器获得的多能窗响应计数作为输入，得到轻、重泥饼环境下的计算结果。结论如下：1）在轻泥饼环境中，X 射线仪器获得的密度和 Pe 平均绝对误差分别为 0.0128 g/cm^3 和 0.08 b/e，比相同环境下使用伽马仪器的计算结果密度误差下降了 13%，Pe 误差下降了 27%。2）在重泥饼环境中，X 射线测井仪器获得的地层密度和 Pe 的平均绝对误差分别为 0.0145 g/cm^3 和 0.17 b/e。相比伽马仪器，密度测量误差下降了 3.33%，而 Pe 误差下降高达 47%，这表明 X 射线对于地层 Pe 变化的高度敏感性有效的提高了其测量准度。因此，通过本文的阐述，我们验证了 X 射线岩性密度仪器设计和测量方法理论上的可行性，特别在一些指标上会优于传统的伽马仪器，这为实际井下 X 射线仪器的优化设计和测量发展提供了理论论证。

作者贡献声明 张琼：数据处理工作、构思并撰写论文、审阅与校对；汪洋：调研文献、实验模拟。

参考文献

1 Slocombe R, Bammi S, Hunka J, et al. Recharacterization and validation of Through-the-Bit-Logging tool measurements[J]. Petrophysics, 2015, 56(01): 58-71.

2 Bloemenkamp R, Haddad E, Bize-Forest N, et al. Field-Testing a Through-the-Bit High-Definition Electrical Borehole Imager for Oil-Based Mud[C]//SPWLA Annual Logging Symposium. SPWLA, 2021: D011S003R003.

3 Runia J, Boyes J, Lodder R J. Through bit logging: applications in difficult wells, offshore north sea[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. SPE, 2005: SPE-92256-MS.

4 Atriby K. ThruBit logging saves time and reduces stuck pipe risk in very challenging downhole conditions[C]//SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition. SPE, 2018: SPE-192336-MS.

5 King III G, Becker A J, Corris G W, et al. Density logging using an electron linear accelerator as the x-ray source[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1987, 24: 990-994.

6 Bayless J R, Burkhart C P, Kuthi A. Advances in X-ray and neutron source technologies for logging applications[C]//SPWLA Annual Logging Symposium. SPWLA, 1993: SPWLA-1993-Y.

7 Badruzzaman A. An assessment of fundamentals of nuclear-based alternatives to conventional chemical source bulk density measurement[J]. Petrophysics, 2014, 55(05): 415-434.

8 Simon M, Tkabladze A, Beekman S, et al. A revolutionary X-ray tool for true sourceless density logging with superior performance[C]//SPWLA Annual Logging Symposium. SPWLA, 2018: D033S002R001.

9 武蕙琳, 金亚, 张琼, 等. 基于数值模拟的 X 射线密度测井仪器源距设计[J]. 核技术, 2022, 45(10):43-50.
Wu Huilin, Jin Ya, Zhang Qiong, et al. A design of source spacing of the X-ray density logging tool based on numerical simulation[J]. Nuclear Technology, 2022, 45(10):43-50.

10 张锋, 李亚芬, 信毅等. 基于 X 射线和伽马源的密度测井数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(1):60-66.
Zhang Feng, LI Yafen, Xin Yi, et al. Numerical simulation of density logging based on X-ray and gamma ray sources[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2018, 42(1):60-66.

11 张泉滢, 刘国斌, 袁超, 等. 基于井下 X 射线源的密度测井仪器参数优化设计[J].中国石油大学，2024, 48(1).
Zhang Quanying, Liu Guobin, Yuan Chao, et al. Parameter optimization design of density logging tool based on underground X-ray source[J]. Journal of China University of Petroleum, 2024, 48(1).

12 于华伟, 杨争春, 刘超卓, 等. X 射线密度测井中 X 射线管高压对密度测量精度的影响[J]. 核技术, 2021, 44(11):49-54.

Yu Huawei, Yang Zhengchun, Liu Chaozhuo, et al. Effects of X-ray tube high-voltages on the density measurement accuracy in X-ray density logging[J]. Nuclear Technology, 2021, 44(11):49-54.

13 Knoll G F. Radiation detection and measurement[M]. John Wiley & Sons, 2010.

14 Eyl K A, Chapellat H, Chevalier P, et al. High-resolution density logging using a three-detector device[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE, 1994: SPE-28407-MS.

15 房鸿, 李耀宗, 黄悦. 新型 X 射线管的研制与性能测试[J]. 真空, 2005, 42(5): 36-38.

Fang Hong, Li Yaozong, Huang Yue. Development and performance testing of a new type of X-ray tube[J]. Vacuum, 2005, 42 (5): 36-38.

16 杜月珍. 小焦点 X 射线管研制开发中的探索与实践[J]. 中国医疗器械杂志, 2004, 28(2): 109-110.

Du Yuezhen. Exploration and practice in the development of small focus X-ray tubes[J]. Chinese Journal of Medical Devices, 2004, 28 (2): 109-110.

17 王虎,刘睿,岳爱忠,等.350 kV 高压 X 射线密度测井探测深度特性及影响[J].核技术, 2023, 46(10):47-53.

Wang Hu, Liu Rui, Yue Aizhong, et al. Detection depth characteristics and effects of. 350 kV high-voltage X-ray density logging[J]. Nuclear Technology, 2023, 46(10):47-53.

18 胡广春, 龚建, 刘晓亚, 等. 体源探测效率计算及修正方法研究[J]. 核电子学与探测技术, 2005, 25(6): 798 - 802, 791.

Hu Guangchun, Gong Jian, Liu Xiaoya, et al. Research on Calculation and Correction Methods for Body Source Detection Efficiency[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2005, 25 (6): 798-802, 791.

19 周悦, 于华伟, 陈翔鸿, 等. 基于 X 射线源的密度测井近源距研究[J]. 核技术, 2018, 41(12): 120401.

Zhou Yue, Yu Huawei, Chen Xianghong, et al. Research on density logging near source distance based on X-ray source[J]. Nuclear Technology, 2018, 41 (12): 120401.

20 迟秀荣，刘竹杰，刘瀚檐，等. 密度测井新方法: X 射线无源密度测井仪[J]. 国外测井技术 2018，39 (6) :73-79.

Chi Xiurong, Liu Zhujie, Liu Hanyan, et al. New density logging method: X-ray passive density logging tool[J]. Foreign logging technology 2018, 39 (6): 73-79.

21 范继林,张锋,田立立,等. X 射线密度测井能谱分析及响应特性研究[J].测井技术, 2021, 45(3):7.

Fan Jilin, Zhang Feng, Tian Lili, et al. Energy spectrum analysis and response characteristics of X-ray density logging[J]. Logging Technology, 2021, 45 (3): 7.